

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ ПЛЕНОЧНЫХ  
СТРУКТУР С P–N-ПЕРЕХОДОМ НА  
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕМНИЕВОЙ  
ОСНОВЕ**РАЙИМЖОН АЛИЕВ, Д.Т.Н.,  
ЭРКИН МУХТАРОВАндижанский Государственный  
Университет, Узбекистан**Title:** *USE PROSPECTS IN MICROELECTRONICS FOR POLYCRYSTALLINE SILICON FILM STRUCTURES WITH p–n JUNCTION***UDC:** 621.592**Key words:** Polycrystalline silicon, grain boundaries, ion-implantation, microelectronics, negative differential resistance, photodiode, I-V characteristics**Annotation:** The paper discusses perspectives of elaborating microelectronic and optoelectronic devices on polycrystalline silicon films. The I-V features of structures with p-n-junction, formed by using methods of p-type conductivity layer grow, thermal diffusion and ion-implantation of boron atoms into n-type polycrystalline silicon layer are compared. The I-V feature with S-form curve of the investigated structures conditioned by changing of the conductivities of base and grain boundaries under thermal processing are revealed.

Границы зерен (ГЗ) в поликристаллическом кремнии (ПК) характеризуются высокой плотностью поверхностных состояний (ПС), специфическим спектром глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне и степенью их заполнения рядами.

Высокотемпературные обработки, являющиеся неизбежными в процессе подготовки базовых пластин и изготовления на их основе приборов электронной техники, приводят к изменению всех трех вышеуказанных характеристик ГЗ. Такие изменения в свою очередь оказывают существенное влияние на процессы генерации-рекомбинации неравновесных носителей заряда и их разделение на контактно-барьерных полях, служащих основанием любого электронного прибора. Исследовательская практика показывает, что наиболее влияющими на процессы переноса носителей заряда в приборных структурах факторами являются режимы термической обработки (ТО) пластин, проводимой при формировании на них эффективного p–n перехода.

В связи с этим представляет интерес исследование процесса переноса носителей заряда в пленочных ПК структурах при формировании на них p–n- перехода методами, различающимися условиями высокотемпературных операций, что является основной целью данной работы.

Рассмотрим результатов экспериментального анализа процессов переноса носителей заряда в структурах, полученных на основе p<sup>+</sup>- и n<sup>+</sup>-пленок ПК. Базовый n-слой с удельным сопротивлением  $\rho \sim 0,1$  Ом·см и толщиной 40 мкм был получен водородным восстановлением тетрахлорида кремния при температуре  $T=1200$  °C в вертикальном реакторе на n<sup>+</sup>-подложках из металлургического кремния (Абакумов и др., 1977) с удельным сопротивлением  $\rho \sim 0,01$  Ом·см. Размеры зерен в поликристаллической подложке

составляли  $>300$  мкм, а выращенный n-слой повторял структуру подложки, и размеры зерен в нем колебались в пределах  $300 \div 2000$  мкм.

Формирование p<sup>+</sup>-n-перехода в образцах осуществлялось тремя способами: - осаждением из газовой фазы p<sup>+</sup>-слоя толщиной  $\sim 2$  мкм при температуре  $1200$  °C; - термодиффузией атомов бора на глубину  $0,5 \div 1,5$  мкм при температуре  $1100$  °C; - ионной имплантацией атомов бора с энергией 75 кэВ с последующим отжигом при  $800$  °C, что давало конечную глубину залегания p–n-перехода на уровне 0,75 мкм.

Уровень легирования p<sup>+</sup>-слоя во всех случаях обеспечивался примерно одинаковым и контролировался поверхностным сопротивлением  $R_0 \sim 50 \pm 5$  Ом/кв. На полученных структурах с размерами  $5 \times 5$ ,  $2 \times 2$ ,  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> в идентичных условиях формировали омические контакты к n<sup>+</sup>- и p<sup>+</sup>-областям и проводили термостатированные измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-емкостных характеристик (ВЕХ) на частоте  $f = 100$  кГц. Темновые ВАХ p<sup>+</sup>-n-структур площадью  $5 \times 5$  мм<sup>2</sup> с p–n-переходами, изготовленными эпитаксией и диффузией, приведены на Рисунке 1. Видно, что в области смещений  $20 < qU/kT < 50$  в пропускном направлении у обоих образцов имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). На ВАХ структур с ионно-имплантированным p–n- переходом (Рисунок 2) участок с ОДС отсутствует.

Отметим, что эти образцы до отжига радиационных дефектов характеризуются наличием сублинейного участка ВАХ. Сублинейный участок ВАХ в пропускном направлении наблюдается обычно в p<sup>+</sup>-n-структурах с n-базой, где осуществлена компенсация глубокими примесями (Муминов и др., 1985).

РИСУНОК 1. ВАХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ  $P^+-N-N^+$ -СТРУКТУР С  $P-N$ -ПЕРЕХОДАМИ, СФОРМИРОВАННЫМИ ЭПИТАКСИЕЙ (КРИВЫЕ 1 И  $1^1$ ) И ДИФфуЗИЕЙ (КРИВЫЕ 2 И  $2^1$ ). КРИВЫЕ 1 И 2 - ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВАХ, КРИВЫЕ 1 И  $1^1$  - ОБРАТНЫЕ

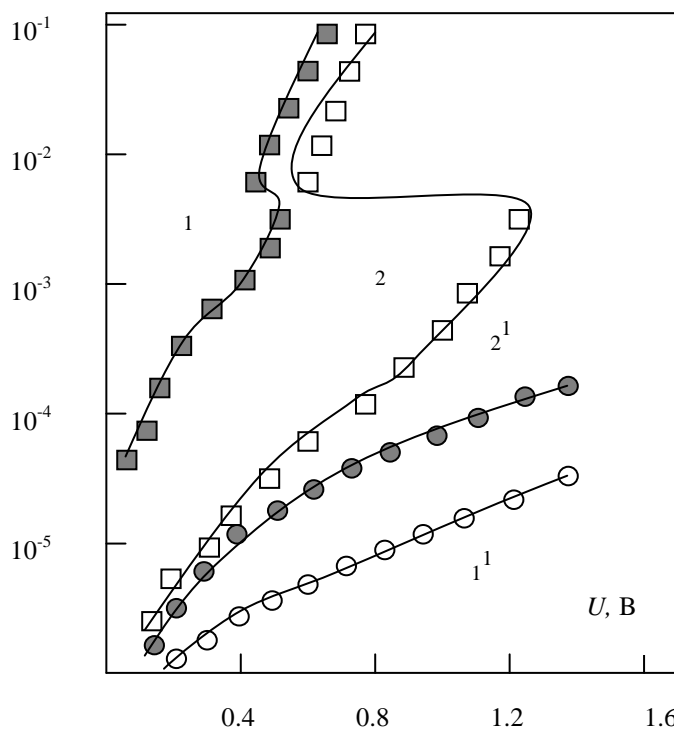
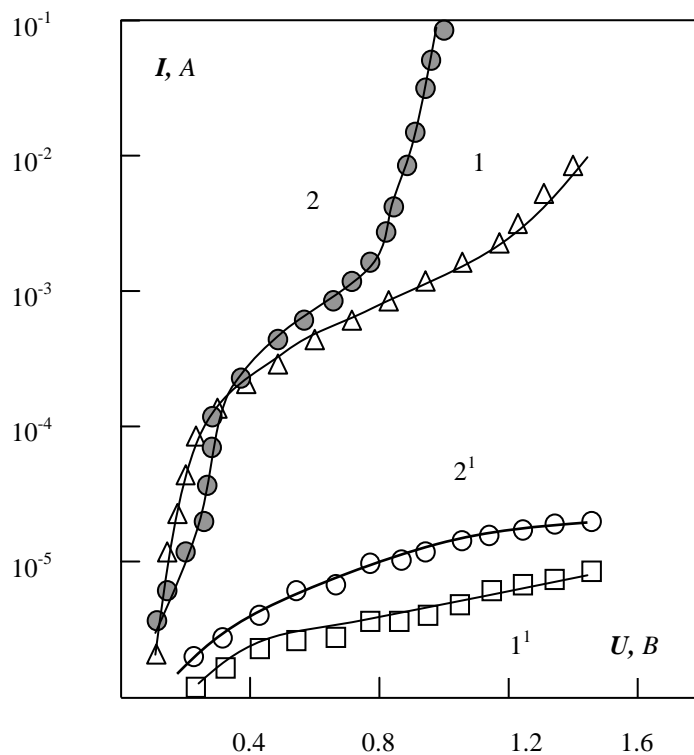


РИСУНОК 2. ВАХ  $P^+-N-N^+$ -СТРУКТУР С ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫМ  $P-N$ -ПЕРЕХОДОМ. КРИВЫЕ 1 И 2 – ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВАХ, КРИВЫЕ  $1^1$  И  $2^1$  – ОБРАТНЫЕ



В нашем случае сублинейная ВАХ преобразуется в S-образную характеристику с напряжениями срыва, лежащими для большой группы образцов (из 1200 штук) в пределах  $0,65 \pm 1,2$  В. Наблюдаемый эффект обусловлен, очевидно, следующим: в пленочных ПК структурах р-п-переход шунтируется дополнительным  $n^+$ -каналом, образующимся на ГЗ за счет сегрегации примеси фосфора, которой легирован п-слой, на высокотемпературной операции создания р-п-перехода. Это происходит потому, что, во-первых, коэффициент сегрегации бора в кремнии в  $2 \pm 3$  раз выше, чем у фосфора (Георгиев и др., 1990), и, во-вторых, коэффициент диффузии фосфора по ГЗ в  $3,5 \pm 3,8$  раз превышает значение, характерное для объема, т.е. внутри зерна (Зи, 1973).

При небольших величинах приложенного напряжения сопротивление этого канала намного меньше сопротивления р-п-перехода и ток протекает преимущественно по ГЗ. Немаловажную роль при этом играют ПС - электронные ловушки на ГЗ в п-слое. Высокотемпературная обработка приводит к увеличению степени заполнения ПС, что сопровождается увеличением объема области обеднения вплоть до размеров, сопоставимых с объемом зерна. В такой ситуации с ростом подаваемого напряжения уменьшается концентрация носителей заряда в объеме полупроводника за счет их эксклюзии (Викулин и Стафеев, 1980), а дифференциальное сопротивление р-п перехода возрастает.

С ростом общего тока через ПК  $p^+-n-p^+$ -структуру сопротивление р-п-перехода уменьшается и происходит перераспределение токов, протекающих по каналу на ГЗ и через р-п-переход. Это сопровождается резким увеличением инжекции носителей заряда в п-слой, и возникающая положительная обратная связь по току [6] создает условия роста проводимости п-слоя с увеличением тока.

В результате на ВАХ исследуемой структуры образуется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) в прямом направлении смещения.

Известны различные модели возникновения S-образной ВАХ диодных структур (Викулин и др., 2008), основная из которых объясняет этот эффект увеличением времени жизни инжектированных носителей заряда в компенсированном глубокими примесными центрами полупроводнике. Предполагалась, что и в исследуемых структурах имела место диффузия примесей, дающих глубокие уровни, из  $p^+$ -подложки в п-слой. Поэтому нами проводились измерения ВЕХ структур в диапазоне температур  $77 \pm 300$  К.

Результаты указали на отсутствие или по крайней мере незначительную концентрацию глубоких примесных центров ( $N_T \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). Обнаруженный непрерывный спектр уровней в

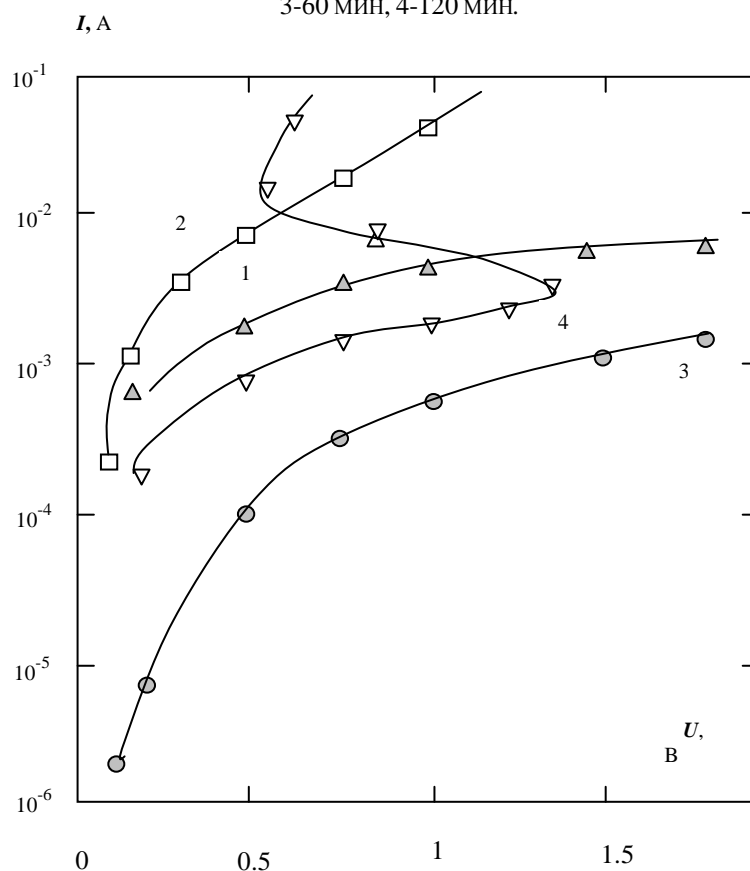
интервале энергии  $E_C - E = -0,2$  эВ, связанный наряду с примесными уровнями и с ПС на ГЗ и комплексами дефектов на них, безусловно указывает на их возможный вклад в формирование механизма переноса носителей заряда в пленочных ПК структурах. Однако основной причиной возникновения S-образной ВАХ, по нашему мнению, является шунтирующие р-п-переход каналы вдоль ГЗ (Алиев, 1997).

Подтверждением правомочности предложенного механизма являются результаты измерений пленочных ПК  $p^+-n-p^+$ -структур с ионно-имплантированным р-п-переходом, которые намеренно подвергали длительному отжигу при  $T = 800^\circ \text{C}$ . Как видно из графика (Рисунок 3), на прямых ветвях ВАХ р-п-перехода, полученного ионным внедрением бора с энергией  $E = 75$  КэВ и дозой  $D = 10^3 \text{ мКл/см}^2$  в  $n-p^+$ -структуру и последовательной термической обработки при температуре  $T_{отж} = 800^\circ \text{C}$  с длительностью отжига  $\geq 60$  мин (кривые 3 и 4) образуется п-канал, шунтирующий р-п-переход, и S-образная ВАХ наблюдается почти на всех ионно-имплантированных образцах. В поддержку предложенного механизма можно привести и факт отсутствия S-образных ВАХ у образцов малого размера ( $\leq 1 \text{ мкм}$ ), в которых ГЗ по микроскопическим наблюдениям либо отсутствуют, либо имеют малую плотность.

С применением методики анализа ВАХ в области объемного заряда, на исследуемых структурах оценивали эффективную скорость поверхностной рекомбинации  $S_{эф}$  носителей заряда. Так, на структурах с р-п-переходом, сформированным методом выращивания пленок с разнотипной проводимостью, значение  $S_{эф}$  составляло до  $5 \times 10^4 \text{ см/с}$ , а на диффузионных структурах  $\sim 10^3 \text{ см/с}$ . Более высокое значение  $S_{эф}$  у структур с р-п-переходом, сформированным осаждением из газовой фазы, связано с более высокой степенью заполнения ПС электронами, что вызвано соответственно более высокой температурой операции создания р-п-перехода. На структурах с ионно-имплантированным р-п-переходом  $S_{эф}$  составляет до отжига радиационных дефектов величину  $2,7 \times 10^4 \text{ см/с}$  и после отжига  $5 \times 10^2 \text{ см/с}$ . Очевидно, что высокое значение  $S_{эф}$  и появление сублинейного участка ВАХ до отжига у этих структур обусловлено именно введением в объем зерна радиационных дефектов на операции ионной имплантации.

Полученные результаты позволяют считать, что для снижения влияния ГЗ на перенос носителей заряда в пленочных ПК структурах целесообразно формировать р-п-переходы в них ионным легированием с последующим кратковременным отжигом дефектов.

РИСУНОК 3. ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВАХ Р-Н ПЕРЕХОДА, ПОЛУЧЕННОГО ИОННЫМ ВНЕДРЕНИЕМ БОРА С ЭНЕРГИЕЙ  $E=75$  КЭВ И ДОЗОЙ  $D=103$  МККЛ/СМ<sup>2</sup> В N-N+ СТРУКТУРУ. ТОТЖ = 800 °С; ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ОТЖИГА: 1-БЕЗ ОТЖИГА, 2-5 МИН, 3-60 МИН, 4-120 МИН.



Полученные результаты указывают также на возможность создания на основе ПК структур полупроводниковых приборов с S-образной ВАХ, в технологии которых целесообразно применять сочетание термообработок с ионным легированием и другие приемы, приводящие к управляемому изменению проводимости ГЗ и зарядовых состояний, а также к компенсации ПС. Очевидно, что на пленочных кремниевых поликристаллических структурах возможно изготовление S-диодов, инжекционных фотоприемников, оптоэлектронных фильтров и т. п.

#### Литература

- Абакумов, А., Карагеоргий-Алкалаев, П., Каримова, И., 1977. В кн. «Физические явления в полупроводниковых структурах с глубокими уровнями и оптоэлектроника», Ташкент, Фан, С. 3-23.
- Алиев, Р., 1997. «Инжекционное усиление фототока в поликристаллических кремниевых  $p^+-n-n^+$  структурах», Физика и

Техника Полупроводников, 1997, т. 31, N.4.С. 425-426.

Викулин, И., Стафеев, В., 1980. Физика полупроводниковых приборов, Москва, Советское радио.

Викулин, И., Курмашев, Ш., Стафеев, В., 2008. «Инжекционные фотоприемники», Физика и Техника Полупроводников, т. 42, вып. 1, С. 113-127.

Георгиев, В. и др., 1990. «Межкристаллитные границы и свойства поликристаллического кремния», «Поверхность», N 9, С. 5-21.

Зи, С., 1973. Физика полупроводниковых приборов, Пер. с англ., Москва, Энергия.

Мўминов, Р., Ахмедов, Ф., Касимова, Т., 1985. «К диффузии примесей по границам зерен в поликристаллическом кремнии», «Гелиотехника», № 1, С. 67-69.